

高分解能角度分解光電子分光による高温超伝導体の 磁気相関と微細電子構造の研究

著者	松井 浩明
号	49
学位授与番号	2232
URL	http://hdl.handle.net/10097/39283

氏名・(本籍)	まつ い ひろ あき 松 井 浩 明
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2232号
学位授与年月日	平成18年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	高分解能角度分解光電子分光による高温超伝導体の磁気相関と 微細電子構造の研究
論文審査委員	(主査) 教授 前 川 禎 通 教授 高 橋 隆, 山 田 和 芳, 小 林 典 男 教授 谷 垣 勝 己

論文目次

第1章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 銅酸化物高温超伝導体の物性

第2章 光電子分光法

- 2.1 光電子分光の原理
- 2.2 角度分解光電子分光
- 2.3 光電子スペクトル関数

第3章 高分解能光電子分光装置

- 3.1 概要
- 3.2 各部の特徴

第4章 ホールドーピング型 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+1}$

($n = 1 - 3$)の電子状態

- 4.1 多層型構造と電子状態
- 4.2 バンド分散におけるkink 構造
- 4.3 ボゴリューボフ準粒子

第5章 電子ドーピング型高温超伝導体の電子状態

- 5.1 擬ギャップと準粒子
- 5.2 超伝導ギャップ対称性
- 5.3 磁性-超伝導相転移

第6章 ホール型と電子型の比較に関する考察

第7章 本研究の総括

業績論文リスト

学会発表

謝辞

論文内容要旨

銅酸化物高温超伝導体の超伝導機構を解明する上で、フェルミ準位近傍における電子の多体相互作用を理解することは重要である。近年、高温超伝導体の電子状態において、擬ギャップや準粒子などの特異な微細構造が観測され、上記の問題に対する手がかりとして精力的な研究が行われている。しかし、多体相互作用の起源については現在も決着していない。本論文では、ホールおよび電子ドーブ型高温超伝導体の高分解能角度分解光電子分光を行うことにより、高温超伝導体における磁気相関と微細電子構造の関係について研究した。以下に研究の詳細について述べる。

ホールドーブ型Bi系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+1}$ ($n=1-3$)について角度分解光電子分光を行い、ブリルアンゾーン中の (π, π) 点を中心とするフェルミ面および $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導ギャップ対称性が、単位胞中の CuO_2 面数(n)によらない普遍的な電子構造であることを見出した。さらにホール型におけるフェルミ準位近傍の多体相互作用を明らかにする目的で、結合エネルギー50-80 meVに観測されるバンド分散のkink構造の波数・温度・ドーブ量・ CuO_2 面数依存性を測定した。その結果、 $(\pi, 0)$ 点近傍の超伝導状態においてkink構造が増強すること、及びこの振る舞いが単位胞中に CuO_2 面を複数枚有する物質においてのみ観測されることを見出した。これらの性質は、多層型構造($n \geq 2$)における磁気共鳴モードと電子の結合によって統一的に説明できることから、これまで大きく混乱していたホールドーブ型のkink構造に関わる多体相互作用の起源が、特異な磁気共鳴モードであると結論した。高温超伝導体の超伝導状態における準粒子が従来のBCS理論の枠組みの中で理解できるのかを明らかにする目的で、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ($T_c = 108 \text{ K}$)のフェルミ準位近傍における角度分解光電子分光を行った。フェルミ準位上下における2つの超伝導コヒーレントピークを同時観測することに初めて成功し、スペクトル強度とエネルギー分散の解析からこれらがBCS理論におけるボゴリューボフ準粒子と定量的に良く一致することを見出した。これにより、高温超伝導体の準粒子がBCS理論によって定量的に正しく記述されることを明らかにした。

電子ドーブ型高温超伝導体におけるフェルミ準位近傍の多体相互作用を解明する目的で、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (NCCO, $x = 0.13-0.17$)の角度分解光電子分光を行った。はじめに、反強磁性相の $x = 0.13$ ($T_N = 110 \text{ K}$)において電子構造の詳細な波数依存性を測定した。フェルミ面と反強磁性ブリルアンゾーンが交差する波数領域(hot spot)において、結合エネルギー約100 meVからの擬ギャップ的なスペクトル強度の抑制を観測し、さらに $(\pi, 0)$ 点近傍のフェルミ準位直下において有効質量の繰り込まれた準粒子バンドを観測した。擬ギャップと準粒子はスペクトルの強い異方性によって波数空間で連続的に接続することから、両者が本質的に同一の電子構造であり、反強磁性相関によるバンドの折り返しと混成の効果によって統一的に説明されると結論した。さらにドーブ量の異なる試料において詳細な温度変化測定を行った。その結果、hot spot近傍の擬ギャップが T_N より高温で明確に存在し、 T_N より約100 K高温の擬ギャップ温度において急激に開閉することを見出した。特異な温度依存性の起源を明らかにするために、擬ギャップ温度のドーピング依存性を決定し、Cuスピンの磁気相関長との比較を行った結果、両者が密接に関係していることを見出した。以上の結果から、電子型高温超伝導体のフェルミ準位近傍における支配的な多体相互作用が反強磁性相関であることを明らかにした。

電子型における超伝導と反強磁性相互作用の関係を明らかにする目的で、 $\text{Pr}_{0.89}\text{LaCe}_{0.11}\text{CuO}_4$ (PLCCO, $T_c = 26 \text{ K}$)の高分解能角度分解光電子分光による超伝導ギャップの直接観測を行った。常伝導状態で決定したフェルミ面に沿って超伝導ギャップの値を見積もり、超伝導ギャップの異方性を精密に決定した。その結果、超伝導ギャップが最大値をもつ波数は、単純な $d_{x^2-y^2}$ 波対称性から予想される $(\pi, 0)$ - (π, π) 方向ではなく、フェルミ面上で反強磁性相互作用が最も強まると予想されるhot spot近傍であることを見出

した。さらに特異な超伝導ギャップの異方性がどのような対称性で表されるかを明らかにするために、 $d_{x^2-y^2}$ 波に対する様々な混合対称性を仮定して数値的な解析を行った。その結果、観測した超伝導ギャップの異方性がhot spotに極大をもつ非単調 $d_{x^2-y^2}$ 波対称性で良く再現できることを見出した。以上の結果は、電子型における超伝導引力相互作用が、フェルミ面上の反強磁性相互作用が最も強まる波数領域において最大となることを示唆することから、電子ドーピング型の超伝導機構に対して反強磁性相互作用が主要な役割を果たしていると結論した。

以上の角度分解光電子分光の結果から、ホール及び電子型高温超伝導体のフェルミ準位近傍における微細電子構造は、バンドの占有率や磁気励起の違いによる部分的な非対称性が見られるものの、反強磁性的な電子相関に起因している点で両者が共通していることを見出した。さらにホール型と電子型において微細電子構造と超伝導の密接な関係が示唆されることから、高温超伝導の発現に本質的な多体相互作用が、ドーピングしたキャリアの符号にかかわらず反強磁性相関であると結論した。

論文審査の結果の要旨

松井浩明君は、本論文「高分解能角度分解光電子分光による高温超伝導体の磁気相関と微細電子構造の研究」において、以下に示す成果を挙げた。

- (1) ホールドーブ型Bi系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+1}$ ($n=1-3$)について角度分解光電子分光を行い、ブリルアンゾーン中の (π, π) 点を中心とするフェルミ面および $d_{x^2-y^2}$ 波の超伝導ギャップ対称性が、単位胞中の CuO_2 面数(n)によらない普遍的な電子構造であることを見出した。
- (2) Bi系高温超伝導体のフェルミ準位近傍においてバンド分散のkink構造を観測し、その波数・温度・ドーブ量・結晶構造依存性から、これまで大きく混乱していたkink構造に関わる多体相互作用の起源が、特異な磁気共鳴モードであることを明らかにした。
- (3) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ($T_c = 108 \text{ K}$)において、フェルミ準位上下の超伝導コヒーレントピークを同時観測することに初めて成功し、そのスペクトル強度とエネルギー分散がBCS理論におけるボゴリューボフ準粒子と定量的に良く一致することを見出した。
- (4) 電子ドーブ型高温超伝導体 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ ($x = 0.13-0.17$)のフェルミ準位近傍において擬ギャップおよび準粒子を観測し、その波数・温度・ドーブ量依存性から、これらの電子構造を形成している多体相互作用の起源がCuスピンの反強磁性相関であることを明らかにした。
- (5) 電子型 $\text{Pr}_{0.89}\text{LaCe}_{0.11}\text{CuO}_4$ ($T_c = 26 \text{ K}$)において超伝導ギャップの直接観測に成功し、その対称性が単純な $d_{x^2-y^2}$ 波ではなく、フェルミ面上のhot spotに最大振幅をもつ非単調 $d_{x^2-y^2}$ 波であることを見出した。これにより、電子型の超伝導機構に対して反強磁性相互作用が主要な役割を果たしていることを明らかにした。

これらの研究成果は、高温超伝導体の超伝導発現機構解明に大きな貢献を成すものである。

以上のことから、松井浩明君は、自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有していると判断される。従って、松井浩明君提出の博士論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。